

## CALCULO DE APORTE CONTAMINANTE GASEOSO EN LOS PRINCIPALES AEROPUERTOS Y RUTAS ARGENTINAS

Matías Coppa<sup>a</sup>; Nahuel Tomassini<sup>a</sup>; Juan Ignacio D'Iorio<sup>a</sup>, Alejandro Di Bernardi<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Grupo de Transporte Aéreo (GTA)- Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería,  
Universidad Nacional de La Plata  
Calle 116 s/n e 47 y 48, (1900) La Plata, Argentina  
matias.coppa@gmail.com

### RESUMEN

*El objetivo del trabajo es cuantificar las emisiones gaseosas de la flota aerocomercial operativa en Argentina al año 2013, en los aeropuertos del Grupo A del Sistema Nacional Aeroportuario.*

*Utilizando la base de datos de emisiones contaminantes de la OACI, se analizó la cantidad de hidrocarburos no quemados, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno aportados por cada ciclo Landing - Take Off (LTO) para todas las aeronaves bajo estudio.*

*Una vez obtenido este aporte, contemplando los datos de frecuencias de vuelos de todas las aerolíneas, se obtuvo el total de las emisiones producidas en el entorno aeroportuario.*

*Se caracterizaron las flotas de todas las aerolíneas, lo que implicó la determinación del fabricante, modelo de aeronave, matrícula y fecha de fabricación, para obtener la potencia específica de cada avión.*

*También se realizó el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> para una altura de vuelo de más de 1000 metros, utilizando la metodología desarrollada por OACI. Las rutas aéreas analizadas son aquellas que vinculan los aeropuertos del SNA.*

### ABSTRACT

*The purpose of this study is to quantify gaseous emissions from the commercial air fleet operating in Argentina, in the airports of the National Airport System, in March 2013.*

*Using the database of pollutant emissions provided by ICAO, the amount of unburned hydrocarbons, carbon monoxide and nitrogen oxides produced by each cycle Landing - Take Off (LTO) for all aircraft under study is analyzed.*

*With the contributions by LTO cycle and frequencies of every airline, total emissions in the airport vicinity was obtained.*

*Fleet characterization (date and manufacturer, aircraft model, registration number) was made in order to specify the engine for each aircraft. To calculate CO<sub>2</sub> emissions for a flight altitude of over 1000 meters, the ICAO calculator was used.*

**Palabras clave:** aeropuertos, flota, contaminantes, rutas, LTO.

### INTRODUCCIÓN

La aviación es uno de los sectores de transporte más importantes en cuanto al crecimiento; de acuerdo a la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA): de 2,4 mil millones de pasajeros en 2010 crecerá a 16 mil millones en 2050. En el mediano y largo plazo, todas las previsiones de tráfico señalan un crecimiento de pasajeros que oscila entre el 2,4% hasta el 4,8% de manera sostenida hasta el año 2020.

Coppa, Tomassini, D'Iorio y Di Bernardi – Cálculo de aporte contaminante gaseoso en los principales aeropuertos y rutas argentinas.

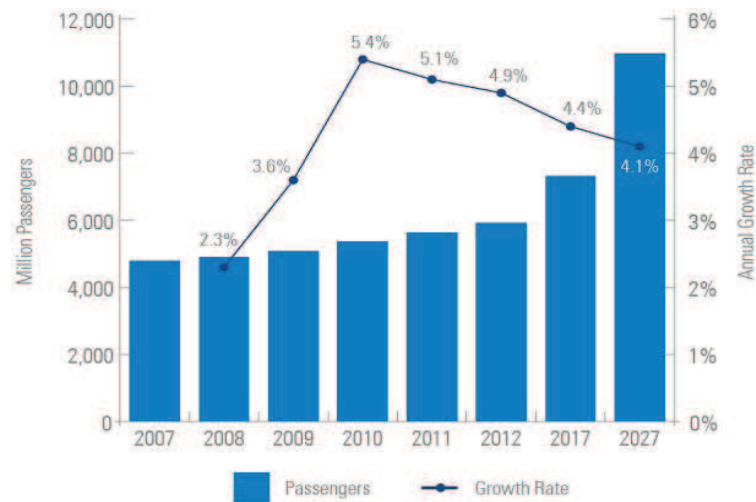


Figura 1.Crecimiento de los pasajeros [1].

Gracias a la mejora de la eficiencia del combustible y la optimización de la gestión del tráfico aéreo, el aumento resultante en el consumo del mismo será a una menor tasa que el aumento del tráfico. Sin embargo, la eficiencia en el consumo debido a la renovación de flota y el progreso tecnológico puede disminuir debido a la madurez de la tecnología y las capacidades reducidas de inversión de las aerolíneas.

IATA prevé un aumento en la demanda de combustible de aviación (Jet A-1)de300-350 millones de toneladas para el año 2030.En el 2010 el consumo de combustible aeronáutico en todo el mundo fue de unas 200 millones de toneladas, sin tener en cuenta unos 27 millones correspondientes a la aviación militar y general.

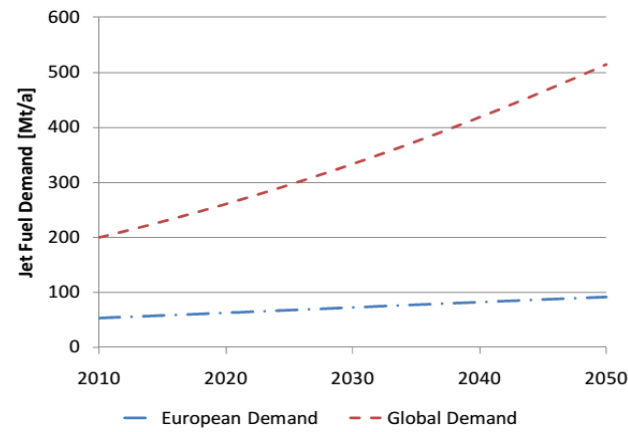


Figura 2.Proyección de la demanda europea y mundial en combustible aeronáutico [2].

En el año 2010, debido al quemado de combustible de los motores de la aviación comercial (Jet A-1) se produjeron 649 millones de toneladas de dióxido de carbono, lo que representa alrededor del 2% del total de 34 mil millones producidas mundialmente en ese mismo año. Si bien dicha cantidad es pequeña comparada con otros sectores como el transporte e industrial, estos últimos cuentan con una mayor variedad de fuentes de energía alternativas utilizables en la actualidad. Las emisiones de dióxido de carbono atribuidas al transporte a nivel mundial se distribuyen según la siguiente figura:

Coppa, Tomassini, D'Iorio y Di Bernardi – Cálculo de aporte contaminante gaseoso en los principales aeropuertos y rutas argentinas.



Figura 3 Contribución del transporte a las emisiones globales de CO<sub>2</sub> [3].

En la siguiente gráfica se muestra el total de toneladas de dióxido de carbono emitido por la actividad aérea desde 1998.



Figura 4. Evolución en las emisiones de CO<sub>2</sub> por la aviación[3].

En la siguiente gráfica se muestran los distintos escenarios posibles respecto a la emisión de CO<sub>2</sub>, y el cumplimiento de diferentes objetivos hasta el año 2050. A nivel internacional, la neutralización en el crecimiento de emisiones de carbono para el 2020 y la reducción del 50% es unameta de suma importancia.

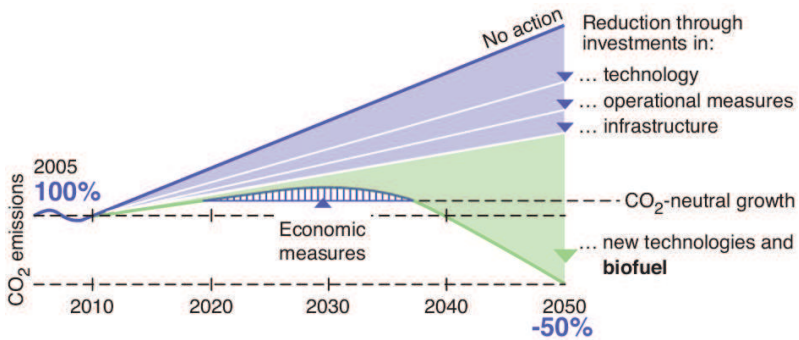


Figura 5. Distintos escenarios respecto a las emisiones de CO<sub>2</sub> producto del tráfico aéreo [4].

La siguiente figura proporciona una simple ilustración de los efectos del quemado de un combustible aeronáutico convencional (Jet A-1). Las cantidades totales de gases emanados dependerán de ciertos factores tales como el tipo de combustible utilizado, la riqueza de la mezcla, la cantidad de combustible, el mantenimiento de la cámara de combustión o del motor en general, entre otros.

Coppa, Tomassini, D'Iorio y Di Bernardi – Cálculo de aporte contaminante gaseoso en los principales aeropuertos y rutas argentinas.

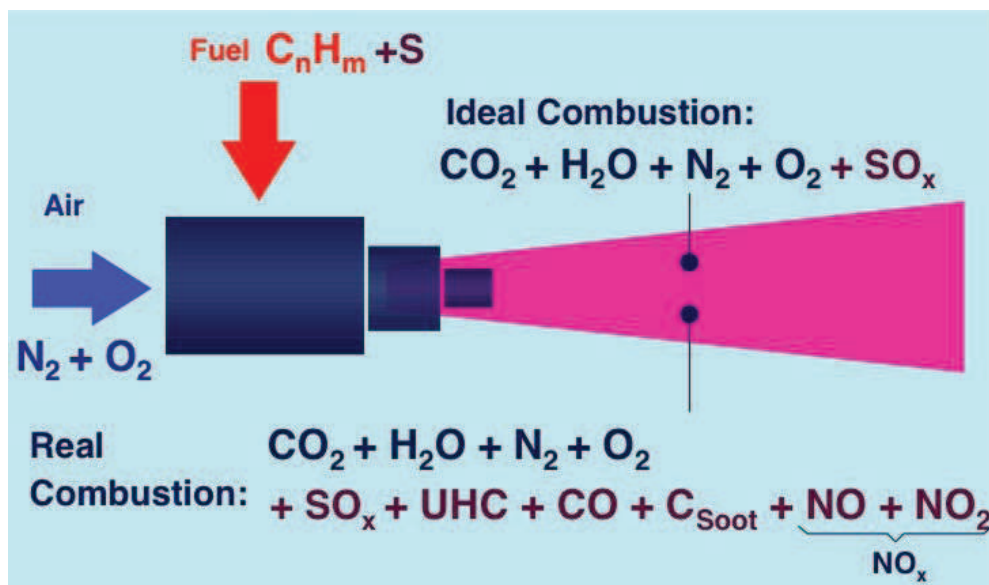


Figura 6. Efectos del quemado del Jet A-1.

La identificación y cuantificación de estas emisiones ha sido uno de los objetivos principales de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), que mediante el Comité sobre la Protección del Medioambiente y la Aviación (CAEP), ha desarrollado una normativa para el desarrollo del transporte aéreo sustentable.

## METODOLOGÍA

Inicialmente se obtuvieron las características de las flotas de todas las aerolíneas que operan en el país, es decir, fabricante, modelo, matrícula y fecha de fabricación, con el objeto de obtener la planta poder específica de cada aeronave. Utilizando la base de datos de emisiones contaminantes de OACI [5], se analizaron las cantidades de hidrocarburos no quemados, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno aportados por cada ciclo LTO (*Landing-Take-Off*) para todas las aeronaves bajo estudio. Una vez obtenido el aporte por ciclo, se incluyeron datos de frecuencias de vuelos de marzo de 2013.

Con la intención de determinar las emisiones de gases contaminantes se ha desarrollado una metodología; en el siguiente diagrama sintético se observa el procedimiento aplicado:



Figura 7. Metodología aplicada para el cálculo de HC, NO<sub>x</sub> y CO.

Para el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub>, la metodología aplicada fue la desarrollada por el calculador de OACI [6]. Dicha metodología permite obtener la masa de CO<sub>2</sub> en kg por pasajero según los aeropuertos seleccionados, conociendo el valor obtenido por una combustión estequiométrica de una tonelada de JetA-1 (3.157 toneladas de CO<sub>2</sub>), y realizando una ponderación de todos los parámetros de vuelo.

Coppa, Tomassini, D'Iorio y Di Bernardi – Cálculo de aporte contaminante gaseoso en los principales aeropuertos y rutas argentinas.

De esta manera, con los datos de las características de las aeronaves estudiadas, el análisis de rutas y frecuencias de vuelo de Marzo de 2013, se obtuvo el total de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Se muestra a continuación el procedimiento de cálculo de forma esquemática.



**Figura 8.** Metodología aplicada para el cálculo de CO<sub>2</sub>.

Sobre la flota aerocomercial operativa en la Argentina se utilizó como referencia el mes de Marzo de 2013; se calcularon las emisiones producidas en el entorno aeroportuario en dicho mes, y con los datos obtenidos de la experiencia de trabajos desarrollados en la UID GTA-GIAI, sobre operaciones históricas de los distintos aeropuertos, se realizó una estimación de las frecuencias mensuales para obtener un valor del aporte anual de contaminantes.

Las aerolíneas analizadas fueron aquellas que operan en los aeropuertos del SNA (Sistema Nacional Aeroportuario), con aeronaves de motorización tipo turbofan; se muestran a continuación las características de la flota de los operadores locales:

**Tabla 1. Motorización de las principales aeronaves comerciales operativas en la Argentina.**

Aerolínea	Aeronave	Motor
LAN Argentina	A320-200	IAE V2527E-A5
Aerolíneas Argentinas	A340-300/200	CFM56-5C2/3
Aerolíneas Argentinas	B737-700/800	CFM56-7B
Andes Líneas Aéreas	MD-83	JT8D-219
Andes Líneas Aéreas	MD-83	JT8D-217C
Austral	E190	GE-CF34-10E
LAN Argentina	B767-300	PW4000

Para las líneas aéreas internacionales la metodología de identificación de la planta poder fue similar a la de los operadores locales.

Según la división expuesta por el ORSNA, los aeropuertos concesionados del Sistema Nacional Aeroportuario son 35, donde el Grupo B está formado por los aeropuertos del Calafate, Ushuaia y Neuquén. Se muestra en la siguiente tabla los aeropuertos estudiados del Grupo A:

**Tabla 2. Aeropuertos bajo estudio del Grupo A.**

Aeropuerto	Código	Aeropuerto	Código
Aeroparque Metropolitano Jorge Newbery, CABA.	AEP	Aeropuerto El Tehuelche, Puerto Madryn.	PMY
Aeropuerto Internacional Suboficial Ayudante Santiago Germano, San Rafael.	AFA	Aeropuerto Internacional de Resistencia.	RES
Aeropuerto de Santa Rosa.	RSA	Aeropuerto Internacional Gob. Ramón Trejo Noel, Río Grande.	RGA
Aeropuerto Internacional Teniente Luis	BRC	Aeropuerto Gobernador Edgardo Castello,	VDM

Coppa, Tomassini, D'Iorio y Di Bernardi – Cálculo de aporte contaminante gaseoso en los principales aeropuertos y rutas argentinas.

Candelaria, San Carlos de Bariloche.		Río Negro.	
Aeropuerto Internacional Ing. A. Taravella, Córdoba.	COR	Aeropuerto Internacional Piloto Civil Norberto Fernández, Río Gallegos.	RGL
Aeropuerto Internacional General Enrique Mosconi, Comodoro Rivadavia.	CRD	Aeropuerto Domingo Faustino Sarmiento, San Juan.	UAQ
Aeropuerto Brigadier General Antonio Parodi, Esquel.	EQS	Aeropuerto Vicecomodoro Ángel de la Paz Aragonés, Santiago del Estero.	SDE
Aeropuerto Internacional Ministro Pistarini, Ezeiza.	EZE	Aeropuerto Internacional Libertador General José de San Martín	PSS
Aeropuerto Internacional de Formosa.	FMA	Aeropuerto Coronel Felipe Varela	CTC
Aeropuerto Internacional Teniente General Benjamín Matienzo, Tucumán.	TUC	Aeropuerto Brigadier Mayor César Raúl Ojeda, San Luis.	LUQ
Aeropuerto Internacional de Puerto Iguazú.	IGR	Aeropuerto Internacional Gobernador Francisco Gabrielli, Mendoza.	MDZ
Aeropuerto Capitán Vicente Almandos Almonacid, La Rioja.	IRJ	Aeropuerto Internacional Astor Piazzolla, Mar del Plata.	MDQ
Aeropuerto Internacional Gobernador Horacio Guzmán, Jujuy.	JUJ	Aeropuerto Internacional Martín Miguel de Güemes, Salta.	SLA

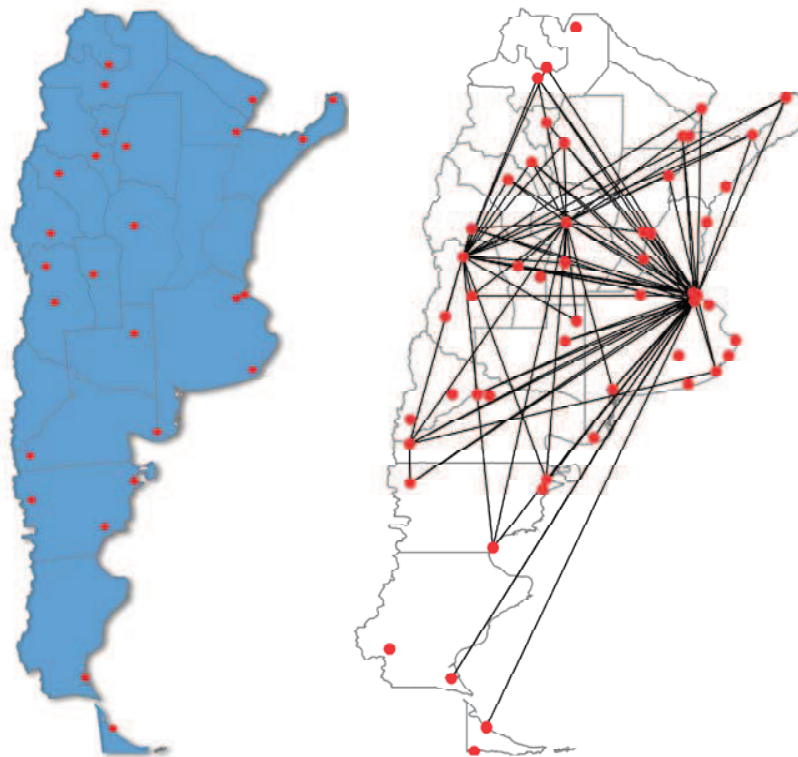
Debido a que en el mes de Marzo de 2013 no han presentado operaciones de la aviación comercial, se desestimaron los siguientes aeropuertos:

**Tabla 3. Aeropuertos del Grupo A desestimados.**

Aeropuerto	Código
Aeropuerto Internacional Comodoro Ricardo Salomón, Malargüe, Mendoza.	LGS
Aeropuerto General Justo José de Urquiza, Paraná, Entre Ríos.	PRA
Aeropuerto Daniel Jukic, Reconquista, Santa Fe.	RCQ
Aeropuerto de Río Cuarto, Río Cuarto, en la provincia de Córdoba, Argentina.	RCU
Aeropuerto de Villa Reynolds, Villa Mercedes, Provincia de San Luis.	VME

A continuación se muestra la ubicación geográfica de dichos aeropuertos y las principales rutas aéreas analizadas.

Coppa, Tomassini, D'Iorio y Di Bernardi – Cálculo de aporte contaminante gaseoso en los principales aeropuertos y rutas argentinas.



**Figura 9.** Ubicación de los aeropuertos analizados y principales rutas analizadas.

Los contaminantes analizados fueron:

- Hidrocarburos no quemados (HC).
- Óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ).
- Monóxido de carbono (CO).
- Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).

Los cálculos de HC,  $\text{NO}_x$  y CO se realizaron para un ciclo LTO (*Landing-Take-Off*). El mismo incluye las siguientes fases operacionales:

- *Landing*: operaciones que se realizan desde los 1.000 metros de altura sobre la cota del aeropuerto hasta que alcanza la superficie de la pista.
- *Taxi in*: maniobras que realiza el avión hasta llegar a su puesto de estacionamiento en plataforma, en condición de *Block-On* (calzos colocados).
- *Taxi out*: son las maniobras que realiza el avión desde el *Block-Off* (calzos afuera) hasta llegar a la cabecera de pista.
- *Take off*: son las operaciones que realiza el avión en la pista para lograr el despegue.
- *Climbout*: son las operaciones que realiza el avión hasta alcanzar los 1.000 metros de altura sobre la cota del aeropuerto.



Coppa, Tomassini, D'Iorio y Di Bernardi – Cálculo de aporte contaminante gaseoso en los principales aeropuertos y rutas argentinas.

Se presentan a continuación, según OACI, los empujes y duración de la condición operativa del ciclo LTO.

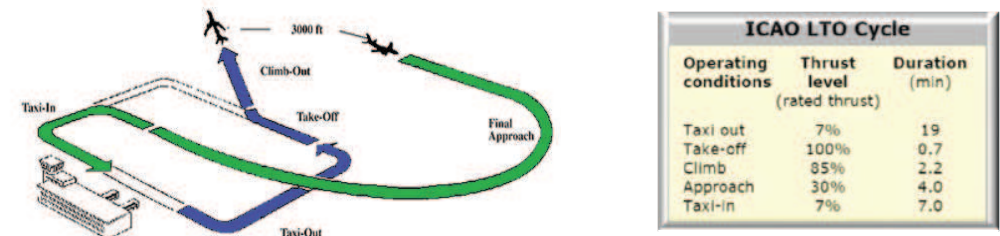


Figura 10. Esquema del ciclo LTO.

Por otro lado, el CO<sub>2</sub> calculado es el emitido durante vuelo crucero, es decir a una altura de vuelo de más de 1000 metros.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De las estadísticas aeroportuarias obtenidas, se pueden prever unas 382.000 operaciones en los aeropuertos del Grupo A del SNA para el año 2013; de dichos movimientos, aproximadamente el 70% es de aeronaves comerciales y un 30 % de aviación general.

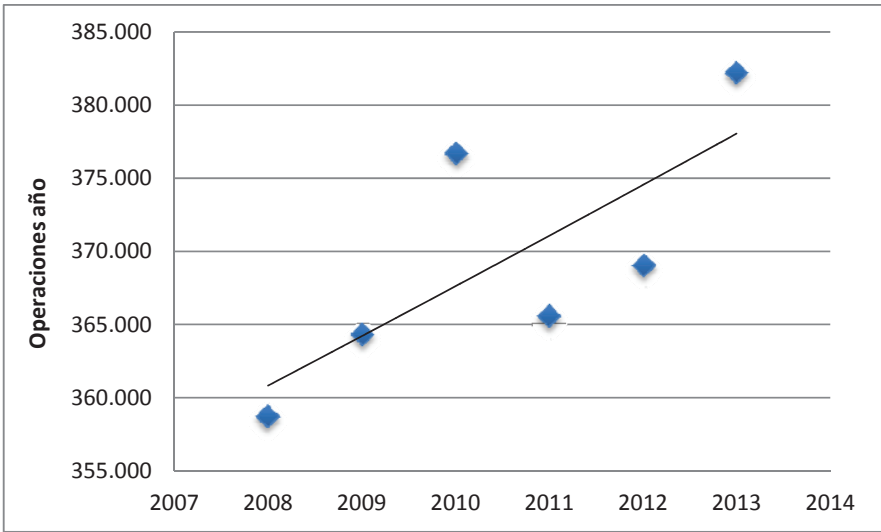


Figura 11. Operaciones por año en el Grupo A del SNA.

Dado que las emisiones se encuentran relacionadas al tipo y modelo de aeronave y la planta poder asociada, en las siguientes figuras se muestra un análisis comparativo de las operaciones de las aeronaves comerciales, y sus motores correspondientes, en el mes de Marzo de 2013 en los aeropuertos del Grupo A del SNA.



Coppa, Tomassini, D'Iorio y Di Bernardi – Cálculo de aporte contaminante gaseoso en los principales aeropuertos y rutas argentinas.

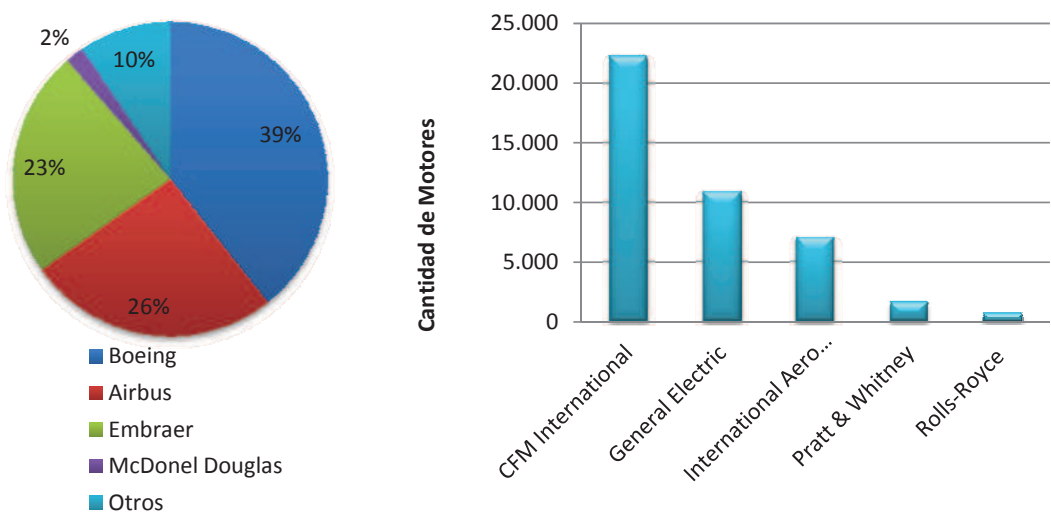


Figura 12. Aeronaves y motorización según cantidad de operaciones, Marzo 2013.

Respecto a las operaciones de las aeronaves de acuerdo al tráfico, Domestico o Internacional, podemos diferenciar:

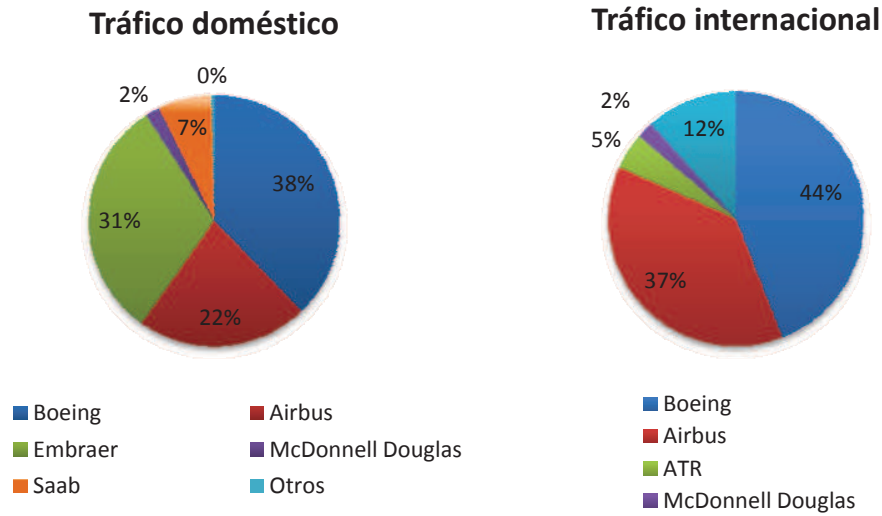


Figura 13. Aeronaves por fabricante de acuerdo al tráfico, Marzo 2013.

De los principales operadores aéreos que operan en el país se muestra a continuación un gráfico comparativo donde se detalla la edad promedio de su flota:

Coppa, Tomassini, D'Iorio y Di Bernardi – Cálculo de aporte contaminante gaseoso en los principales aeropuertos y rutas argentinas.

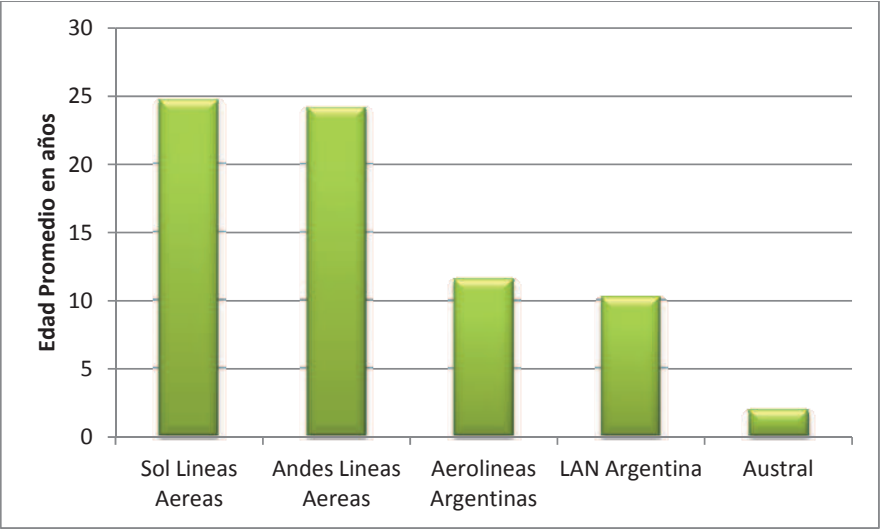


Figura 14. Edad promedio de la flota de las principales aerolíneas que operan en la Argentina, 2013.

Asociadas a las 265.000 operaciones de la aviación comercial, proyectadas para el 2013, se estudian las emisiones correspondientes en cada uno de los aeropuertos del sistema. Se muestran a continuación los resultados de las emisiones gaseosas (HC, CO, NO<sub>x</sub>) obtenidos para el escenario anual.

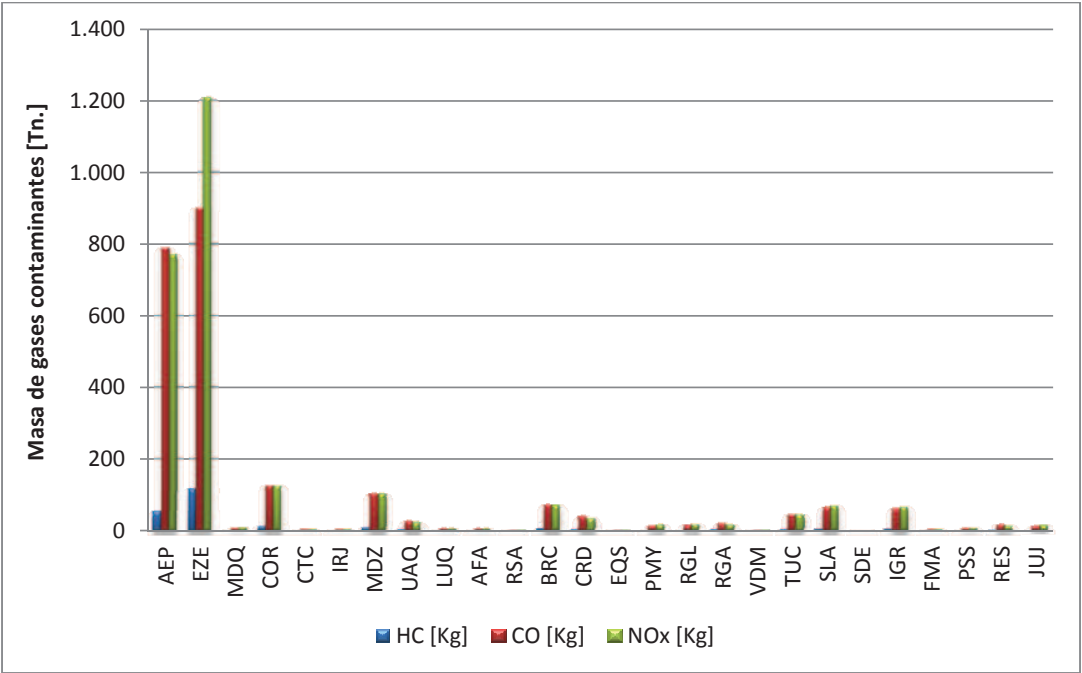


Figura 15. Emisiones gaseosas anuales en los aeropuertos considerados del Grupo A del SNA, escenario 2013.

Coppa, Tomassini, D'Iorio y Di Bernardi – Cálculo de aporte contaminante gaseoso en los principales aeropuertos y rutas argentinas.

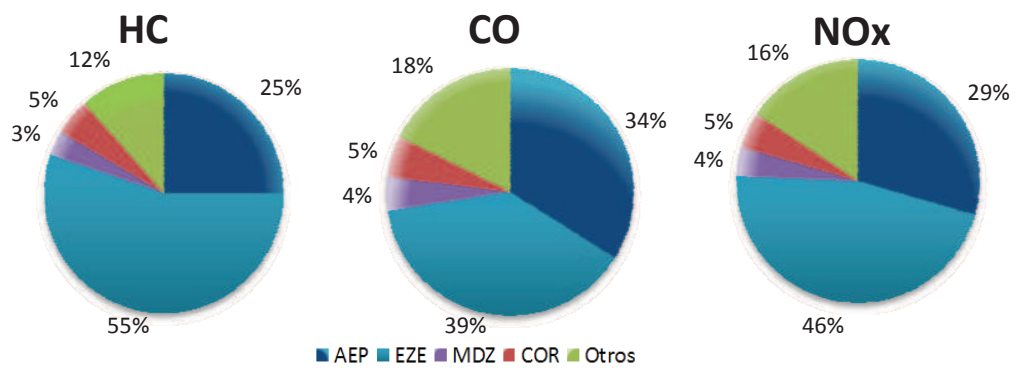


Figura 16. Emisiones anuales de HC, CO y NO<sub>x</sub> en ciclos LTO en los principales aeropuertos de la Argentina, año 2013.

Con el objeto de evidenciar los pesos relativos de los otros aeropuertos se presenta continuación los resultados del análisis efectuado respecto de las emisiones gaseosas contaminantes:

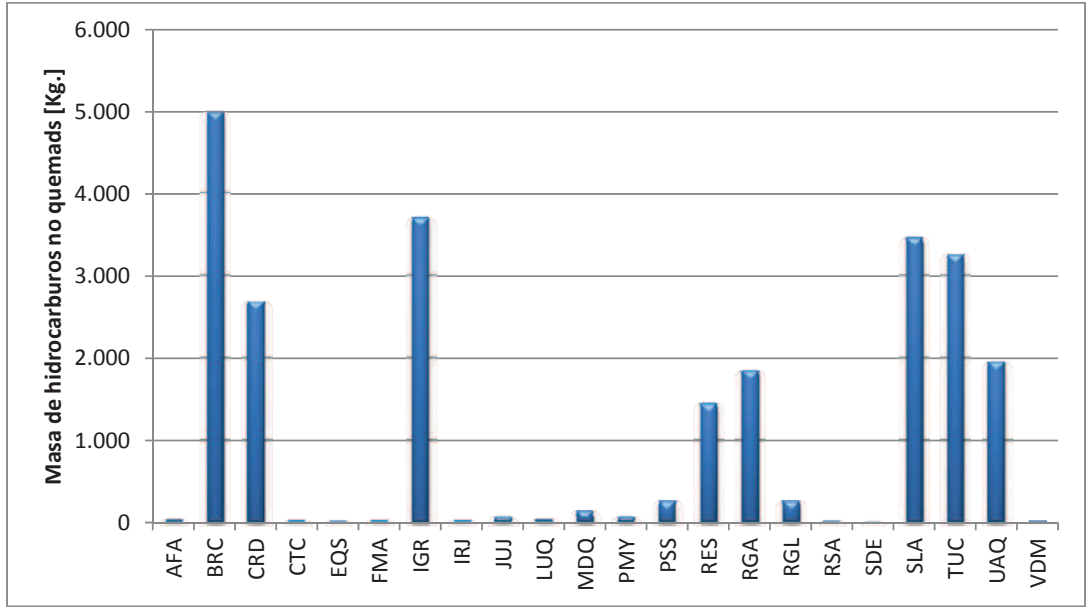


Figura 17. Emisiones anuales de HC en ciclos LTO en los principales aeropuertos de la Argentina, año 2013.

Coppa, Tomassini, D'Iorio y Di Bernardi – Cálculo de aporte contaminante gaseoso en los principales aeropuertos y rutas argentinas.

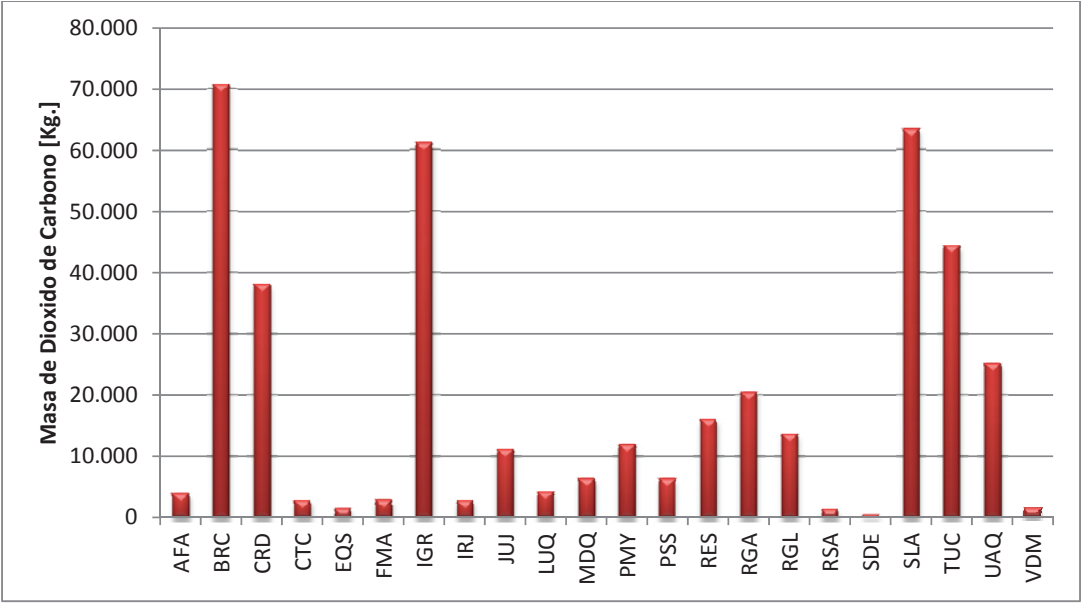


Figura 18.Emisiones anuales de COen ciclos LTOen los principalesaeropuertos de la Argentina, año 2013.

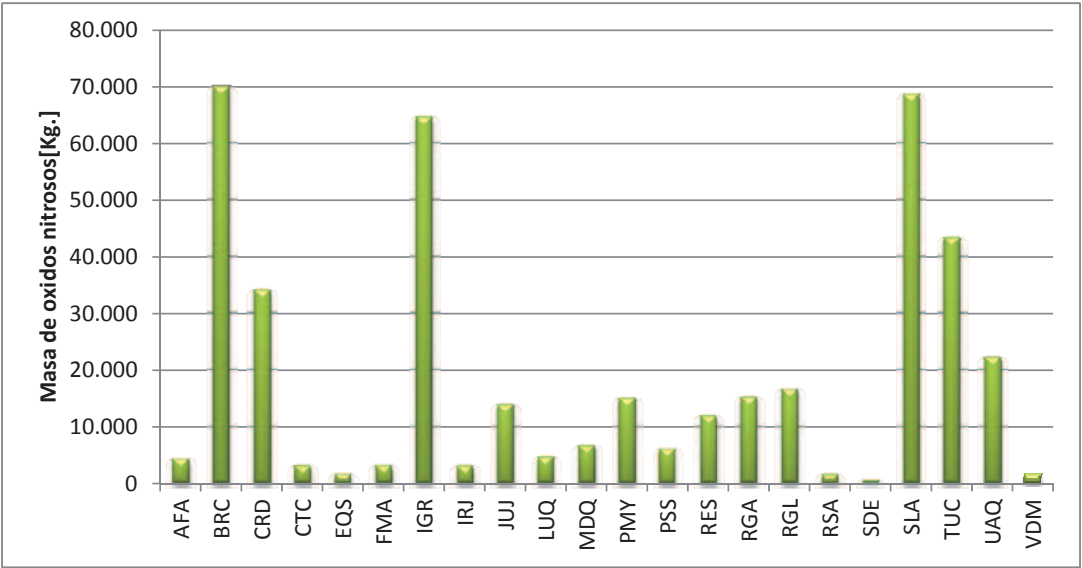


Figura 19.Emisiones anuales de NO<sub>x</sub> en los ciclos LTO en losprincipales aeropuertos de la Argentina, año 2013.

En la siguiente tabla se muestra una estimación de los gases contaminantes que se emitirán en el año 2013 en los aeropuertos del Grupo A del Sistema Nacional Aeroportuario:

Tabla 4.Total de emisiones contaminantes para el año 2013.

En ciclo LTO			
	HC (Tn.)	CO (Tn.)	NO <sub>x</sub> (Tn.)
Emisiones [Tn]	201,036	2.326,38	2.615,54

Coppa, Tomassini, D'Iorio y Di Bernardi – Cálculo de aporte contaminante gaseoso en los principales aeropuertos y rutas argentinas.

Se presentan a continuación las emisiones de dióxido de carbono en un nivel de vuelo mayor a 1.000 metros, producidas por las aeronaves comerciales en el mes de Marzo de 2013.

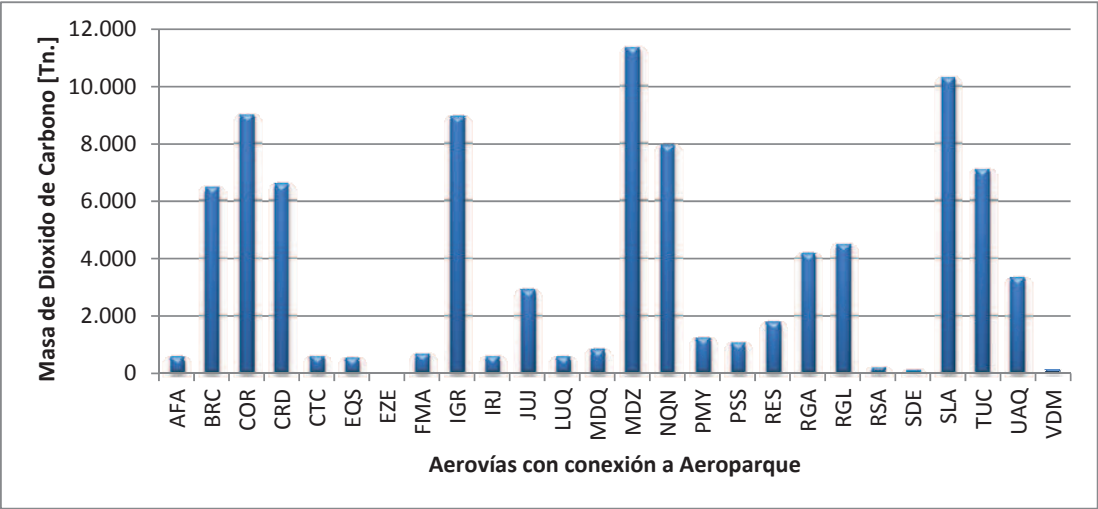


Figura 20. Emisiones mensuales de CO<sub>2</sub> en crucero en las rutas con conexión en Aeroparque, marzo 2013.

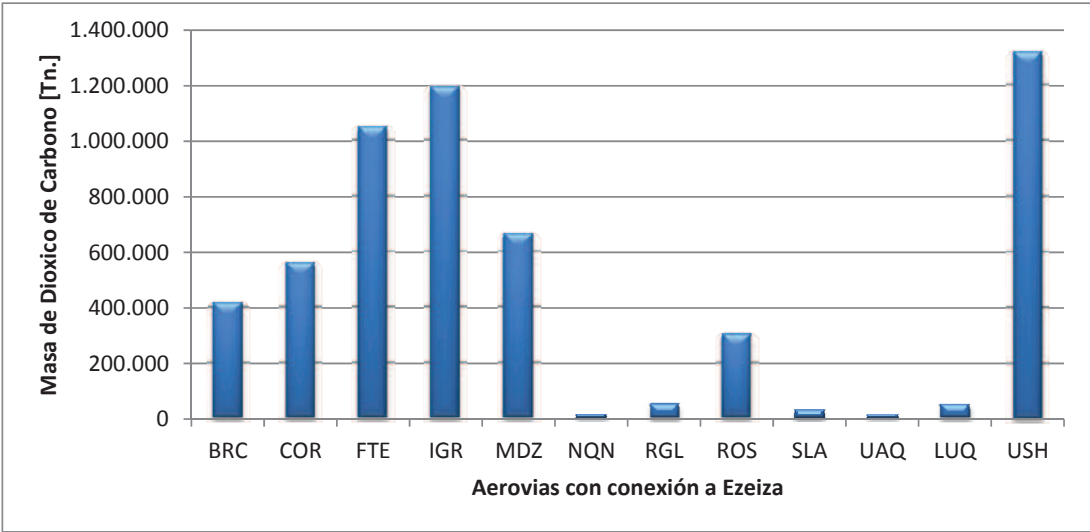


Figura 21. Emisiones mensuales de CO<sub>2</sub> en vuelo en las rutas con conexión en Ezeiza, marzo 2013.

Coppa, Tomassini, D'Iorio y Di Bernardi – Cálculo de aporte contaminante gaseoso en los principales aeropuertos y rutas argentinas.



Figura 22. Emisiones mensuales de CO<sub>2</sub> en vuelo en las rutas con conexión entreaeropuertos analizados, Marzo 2013

El total de emisiones de CO<sub>2</sub> producidas en las rutas aéreas argentinas se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 5. Total de Dióxido de Carbono emitido, marzo 2013.

Emisiones de CO <sub>2</sub> en crucero [Tn.]	
Vuelos hacia / desde Aeroparque	91.143,33
Vuelos hacia / desde Ezeiza	5.676,25
Vuelos en el Interior	5.901,87
Total	102.721,45

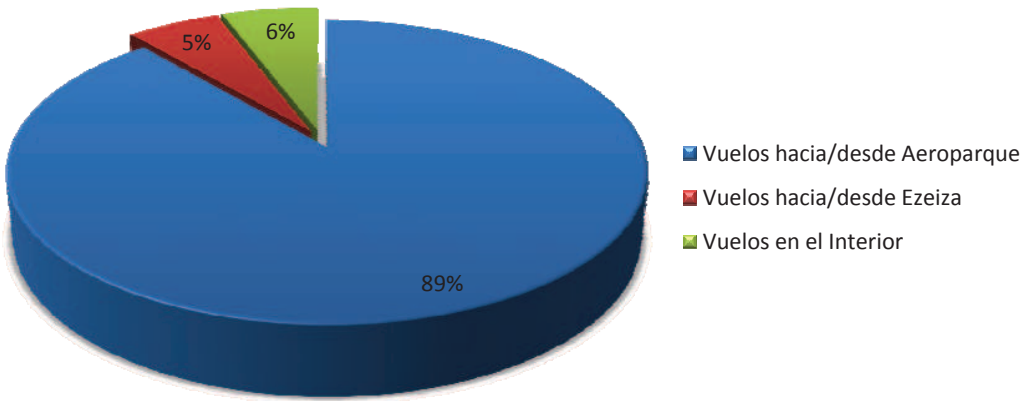


Figura 23. Peso relativo de la emisión de CO<sub>2</sub> en las aerovías argentinas, marzo 2013.

Coppa, Tomassini, D'Iorio y Di Bernardi – Cálculo de aporte contaminante gaseoso en los principales aeropuertos y rutas argentinas.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos dependen fuertemente de la cantidad de operaciones, tanto en el ciclo LTO como rutas voladas, pero se observa a su vez, que el tipo y modelo de aeronave con su planta poder asociada, son un parámetro de gran importancia al momento de cuantificar las emisiones gaseosas contaminantes. Como así también los procedimientos de aproximación, aterrizaje y despegue, que se utilicen para definir los escenarios operacionales. Dada la dependencia de las aeronaves en el aporte gaseoso y la fuerte dinámica del sector aeronáutico, resulta de gran importancia la caracterización constante de dichos escenarios.

Los valores obtenidos representan el aporte contaminante global por aeropuerto. La definición de la calidad del aire del entorno aeroportuario debe estar acompañada a su vez de un análisis de dispersión de la muestra gaseosa que, sobre parámetros ambientales y condiciones de atmosfera, brinden el impacto real sobre el entorno aeroportuario. A su vez, se acentúa la importancia del relevamiento en campo para la verificación de los resultados obtenidos mediante simulación.

Respecto de la cuantificación anual de las emisiones gaseosas, se observa que el Aeropuerto de Ezeiza aporta el mayor porcentaje de gases contaminantes (HC, CO, NO<sub>x</sub>), siendo este de alrededor del 47% de la totalidad del aporte de los aeropuertos estudiados. En segundo lugar se encuentra Aeroparque, que con un número de pasajeros transportados similar a Ezeiza, aporta casi el 30% de la totalidad. Dicha diferencia es atribuida al tipo, edad de aeronaves, planta poder, escenarios operacionales y operaciones anuales realizadas en dichos aeropuertos.

Por otra parte, del análisis de emisiones en crucero se concentró solamente en aquellos vuelos de cabotaje. En ese contexto era de esperar que las aerovías con conexión a Aeroparque, por concentrar gran parte del tráfico aéreo doméstico y ser centro de operaciones de la aerolínea de bandera, sean las de mayor aporte de dióxido de carbono (casi el 90%).

Este tipo de ejercicio debe ser completado con el aporte contaminante del resto de elementos que operan dentro del aeropuerto, como es el caso de vehículos de asistencia, estacionamientos y unidades auxiliares de potencia (APU).

Los valores obtenidos muestran que es necesario a nivel global la implantación de operaciones y procedimientos, tanto en aproximación como en tierra, para la mitigación y reducción de aportes gaseosos.

## REFERENCIAS

- [1] Airport Council International, "Annual World Airport Traffic Report (WATR)", 2012
- [2] SWAFEA, "Sustainable Way for Alternative Fuels and Energy in Aviation", European Commission, April 2011
- [3] European Environment Agency, "EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook", 2009
- [4] International Air Transport Association. "Vision 2050", Febrero 2011
- [5] OACI, "Aircraft Engine Emissions Databank", Marzo 2012
- [6] OACI, "CarbonEmissionsCalculator", Agosto 2009